

ПРИМЕНЕНИЕ ДОМЕННОГО ГАЗА В КОМБИНИРОВАННОМ ПАРОГАЗОВОМ ЦИКЛЕ

Аннотация

В докладе представлен существующий мировой опыт использования парогазовых установок (ПГУ) на доменном газе. Проведена оценка выхода доменного газа в разных странах за последние 5 лет. Представлен энергетический потенциал доменного газа в сравнении с природным газом. Описаны наиболее распространенные схемы сжигания доменного газа из европейского списка наилучших доступных технологий для металлургической промышленности. Рассмотрено распределение мощностей ТЭС металлургических предприятий по моделям газовых турбин и по странам. Проведено сравнение КПД металлургических ПГУ с ПГУ на природном газе и ПГУ с внутрицикловой газификацией твердого топлива.

Ключевые слова: парогазовая установка; газотурбинная установка; доменный газ; бедные промышленные газы, наилучшие доступные технологии.

Abstract

The real-world experience of the blast furnace gas firing combined cycle plants is presented. The yield of blast furnace gas in different countries over the last 5 years is estimated. The energy potential of blast furnace gas is compared with natural gas. The most common combustion schemes for blast furnace gas from the European list of the best available technologies for the metallurgical industry are described. The distribution of capacities of TPPs of metallurgical enterprises by models of gas turbines and by countries is considered. Comparison of the efficiency of metallurgical combined cycle plants with natural gas combined cycle plants and integrated gasification combined cycle.

Key words: combined cycle plant; gas turbine; blast furnace gas; low calorie industrial gases, best available technology.

Введение

На сегодняшний день доменный процесс остается основной технологией экстрактивной металлургии железа [1]. Россия находится на третьем месте в мире по выпуску чугуна и выходу доменного газа. На рис. 1 показаны оценочные объемы доменного газа, полученные авторами на основании известных данных по производству чугуна в разных странах [2, 3].

Особенность выработки чугуна в России в том, что он производится в основном на пяти комбинатах: ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК), ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК), Череповецкий металлургический комбинат ОАО «Северсталь», ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ОЗСМК), ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (НТМК).

Объемы выхода доменного газа составляют не менее чем: НЛМК, ММК, Северсталь по 8; ЗСМК – 6, НТМК – 5 млрд.м³/год. Выход доменного газа отличается неравномерностью, но её во многом компенсирует общезаводская система трубопроводов доменного газа. В масштабах крупных заводов их объем достигает 12–16 тыс.м³. На рис. 2 приведен пример неравномерности выхода доменного газа для завода с тремя домнами объемом по 3200 м³ [4].

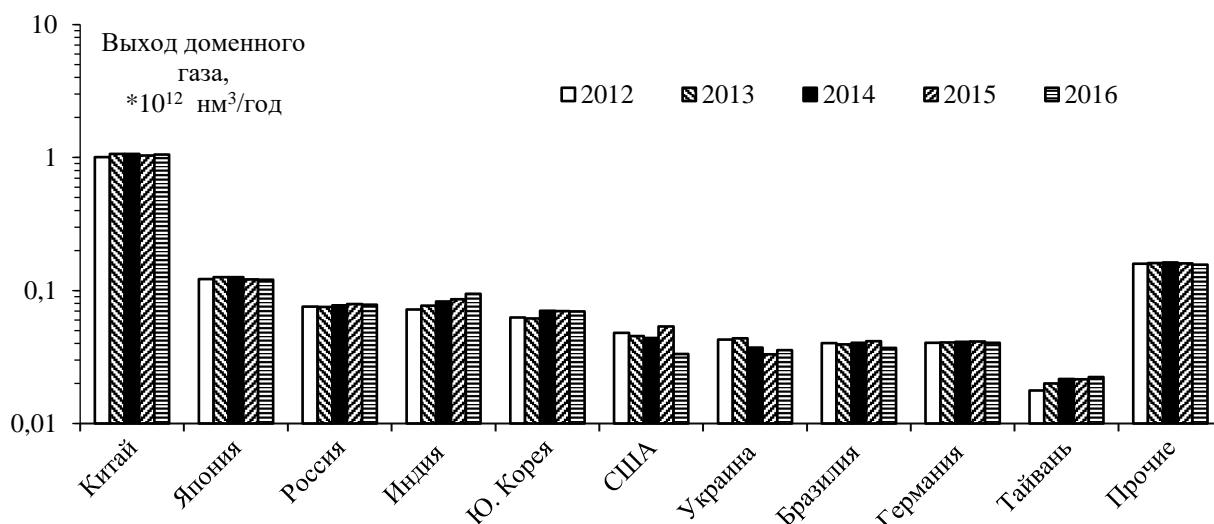


Рис. 1. Оценка выхода доменного газа в разных странах

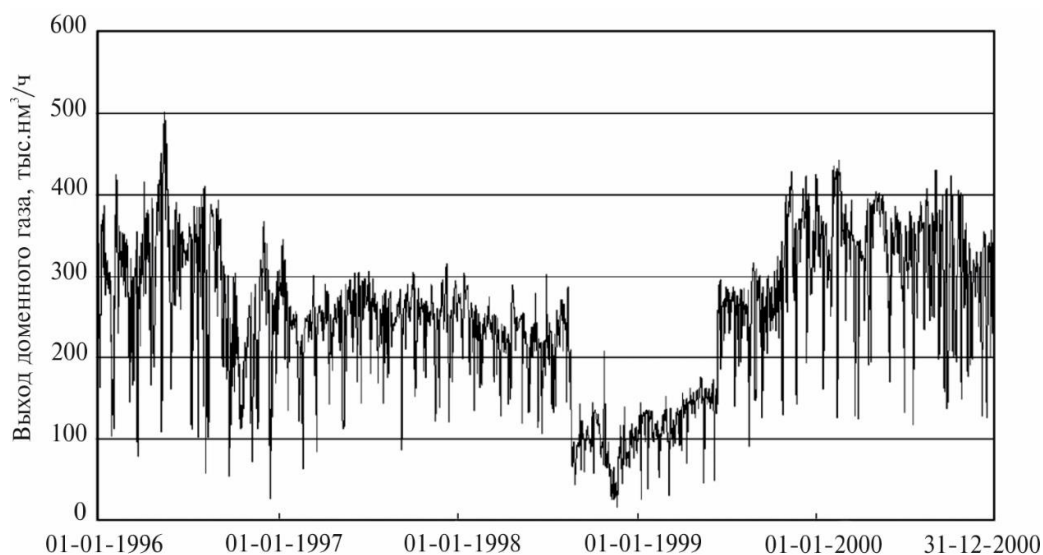


Рис. 2. Неравномерность выхода доменного газа [4]

Оценка энергетического потенциала доменного газа приведена на рис.3. Оценка выхода доменного газа осуществлена по объемам выплавки чугуна в доменных печах в 2013 г. [2]. Данные по объемам потребления природного газа в 2013 г. заимствованы из [5].

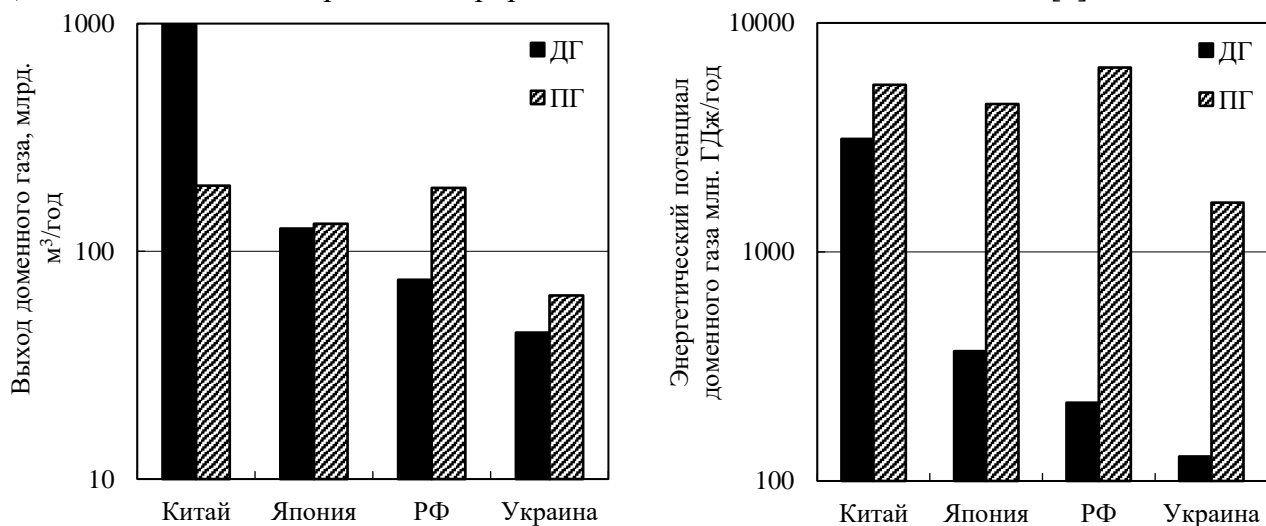


Рис. 3. Выход (а) и энергетический потенциал (б) доменного газа (ДГ) в сравнении с природным газом (ПГ)

Из рис. 3 видно, что для развитых экономик энергетический потенциал доменного газа составляет значимую величину даже в сравнении с природным газом.

Существующие схемы энергетического использования промышленных газов

Горючие газы промышленных производств (доменный, коксовый и другие) являются побочным продуктом основного цикла и затраты на их получение входят в стоимость основной продукции [6]. Подготовка к сжиганию относительно не трудоемка, поскольку обычно ограничивается пылеочисткой, реже – сероочисткой и подогревом, а при использовании в ГТУ – компрессией. Сжигание осуществляется на размещаемых на территории предприятия газоиспользующих агрегатах.

В настоящее время утилизация бедных промышленных газов с выработкой тепловой и электрической энергии осуществляется по трем технологиям, две из которых включены в европейский перечень Наилучших Доступных Технологий для металлургической промышленности [7]. В соответствии с Федеральным законом от 21.07.2014 N 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» в России предусматривается государственная поддержка деятельности по внедрению Наилучших Доступных Технологий.

Технология №1. Сжигание бедных промышленных газов в котлах и печах

Эта технология находит наиболее широкое применение в России и в мире. Она предусматривает совместное сжигание доменного газа с природным или коксовым газом в топке парового котла или в печах. Например, на утилизационной ТЭЦ НЛМК доменный газ, обогащенный коксовым или природным газом, сжигается с целью выработки электрической и тепловой энергии для покрытия собственных и городских нужд, а также с целью производства дополнительного количества пара для собственных нужд. Электрическая мощность ТЭЦ составляет 150 МВт, а тепловая мощность – 115 Гкал/ч. С вводом ТЭЦ уровень самообеспечения электроэнергией вырос до 56–60 %, повысилась энергетическая независимость НЛМК от внешних источников электроэнергии и одновременно была решена задача утилизации доменного газа (в смеси с природным газом) в объемах до 360 тыс. нм³/ч (расход природного газа – 21 тыс. нм³/ч) [8].

Другим вариантом рассматриваемой технологии является сжигание в двухтопливных паровых котлах вместе с углем. По мере увеличения доли теплоты, вносимой в топку бедными газами, КПД двухтопливного котла снижается на несколько процентов. Это вызывается снижением адиабатной температуры горения топлива, ухудшением условий теплообмена и ростом потерь с уходящими газами. На ТЭЦ металлургического завода в Польше установлены два двухтопливных котла, работающих на антраците и доменном газе. Установленная электрическая мощность ТЭЦ составляет 150 МВт, максимальная тепловая мощность на нужды теплоснабжения – 210 МВт. Эффективность утилизационных ТЭЦ составляет порядка 36 % [3, 9].

Технология №2. Двухтопливная ПГУ с дожиганием

Схема предлагает использовать доменный газ для дожигания в котле-утилизаторе парогазовой установки с газовой турбиной, работающей на природном газе [9]. Эффективность такой схемы составляет 46% [7].

Технология №3. Металлургические ПГУ на доменном газе

Мировые лидеры производства чугуна и стали Япония, Китай и другие страны используют более эффективную схему сжигания доменного газа в ПГУ, подавая его не в котел-утилизатор, а в камеру сгорания газовой турбины.

Схема такой ПГУ похожа на схему двухтопливных ПГУ с дожиганием, но топливом для газовой турбины служит доменный газ, а котел-утилизатор работает без дожигания дополнительного топлива.

На металлургических предприятиях Китая за период с 1997 по 2006 г. введено в работу 13 таких ПГУ общей мощностью 2,3 ГВт [10]. В Японии на 18 металлургических предприятиях работают ПГУ компании МНІ с общей мощностью более 2,5 ГВт. На Украине два блока ПГУ общей мощностью 303 МВт на базе ГТУ МНІ М701S (DA) установлены на

Алчевском металлургическом комбинате с КПД по выработке электроэнергии 45% [14], работающие на смеси доменного, коксового и конвертерного газов. В других странах общая мощность ПГУ на доменном газе составляет более 2,4 ГВт. Перечень металлургических предприятий, установивших ГТУ и ПГУ на доменном и коксодоменном газе, приведен в [3, 9].

Распределение мощностей ТЭС металлургических предприятий, приведенных в [3, 9], по моделям газовых турбин представлено на рис.4а. Суммарная установленная мощность газовых турбин на металлургических предприятиях в отдельных странах приведена на рис. 4б.

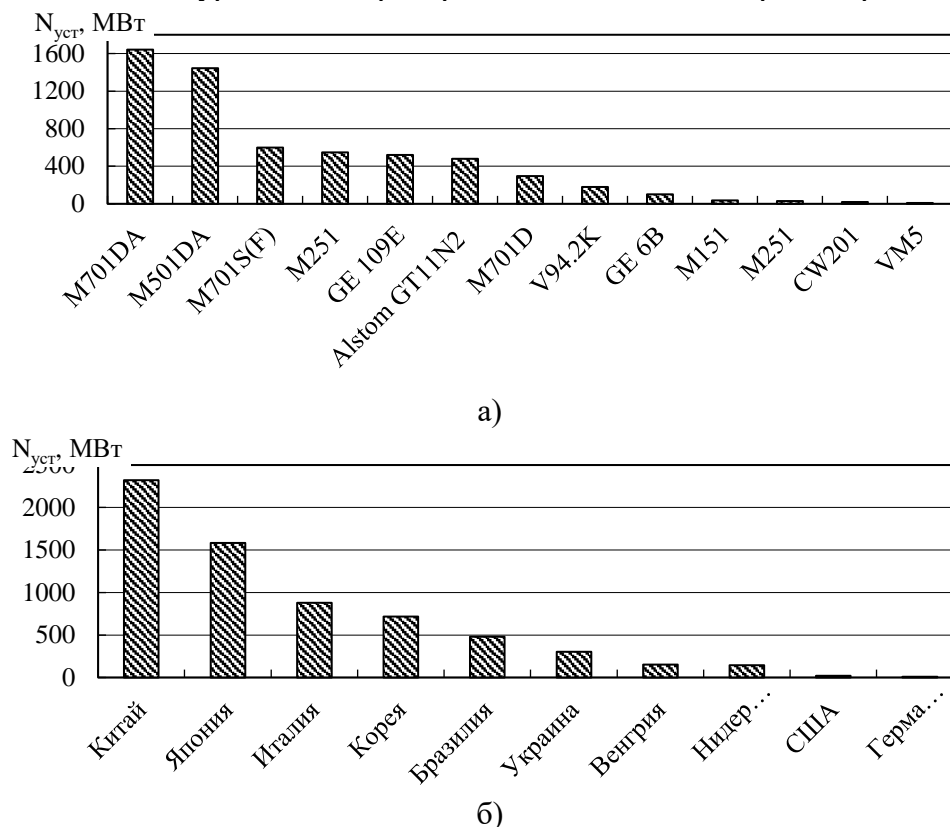


Рис. 4. Распределение мощностей ТЭС металлургических предприятий по моделям газовых турбин (а) и по странам (б)

Как видно, лидирующие позиции по установленной мощности занимают ГТУ компании Mitsubishi Heavy Industries (с 2014г. – Mitsubishi Hitachi Power Systems), а лидирующей страной по внедрению металлургических ПГУ является Китай.

В конце 80-х годов прошлого века компания МНІ установила на заводе Chiba Works (Япония) блок ПГУ, работающий на смеси доменного, конвертерного и коксового газов с газовой турбиной MW701D на 124 МВт и двухконтурным котлом-утилизатором (параметры в контурах: 1-й: 6,5 МПа, 518 °С, 2-й: 0,83 МПа, 281 °С). Мощность паровой турбины 58 МВт, газового компрессора – 37 МВт. Номинальная мощность блока – 145 МВт, КПД – 46 % [11].

Идентичный блок установлен МНІ на ТЭС Velsen металлургического завода Hoogovens (Нидерланды) [12]. Топливом для блока служит смесь доменного, конвертерного и природного газов с теплотой сгорания 4,2 МДж/нм³. КПД этой ПГУ составляет 45,6 %.

На металлургическом заводе в г. Таранто (Италия) было установлено 3 блока ПГУ суммарной электрической мощностью 530 МВт, работающих на металлургических газах. Отличительной особенностью этой ТЭС является возможность работы, как на природном газе, так и на низкокалорийной смеси с бедными газами. Схемой предусмотрена возможность дожигания природного газа в котле-утилизаторе. В ПГУ применены стандартные газовые турбины для природного газа (производитель – Nuovo Pignone/Turbotechnica), с модернизированной топливной системой для низкокалорийного газа. Мощность газовой турбины 103 МВт, паровой турбины – 86 МВт. КПД по выработке электроэнергии – 43,4 % [13].

В табл. 1 и 2 представлены данные европейского союза металлургов [7] и японских машиностроителей [15, 16] по эффективности вариантов использования бедных промышленных и синтез-газов на заводских ТЭС и ПГУ–ВЦГ.

Таблица 1

Эффективность энергетического использования промышленных и синтез-газов

Тип ТЭС	КПД по выработке э/э, %		Коэффициент использования теплоты топлива, %
	Существующие станции	Проектируемые станции	Существующие и проектируемые станции
Утилизационная ТЭЦ [7]	24–36–41*	34–44*	54–56**
Металлургические ПГУ на ПГ с дожиганием ДГ в КУ [7]	46	н.д.	45–55 60**
Металлургические ПГУ на ДГ без дожигания [4, 15, 16]	43–51	н.д.	н.д.
ПГУ–ВЦГ [17–18]	41–44	н.д.	н.д.
Пылеугольные ТЭС на сверхкритических параметрах	42***	н.д.	н.д.
ПГУ на природном газе [19]	58–62,2***	н.д.	н.д.

* большие значения соответствуют режимам работы преимущественно на природном газе и конденсационной выработке.

** при работе с максимальным отпуском тепловой энергии (в теплофикационном режиме).

*** введенные в эксплуатацию после 2010 г.

Как видно из табл. 1, КПД утилизационной ТЭЦ, сжигающей бедные промышленные газы, находится на уровне 24–36 %, переход на цикл ПГУ с дожиганием обеспечивает увеличение КПД на 10–20 %, а фактическое значение КПД-нетто металлургических ПГУ без дожигания на доменном газе, достигнутое на предприятиях Японии и Китая находится уже в районе 51 % [15], что на ~7–10 % выше чем на ПГУ–ВЦГ и на ~7–11 % ниже чем при работе аналогичного оборудования на природном газе.

Топливный разрыв в эффективности между металлургическими ПГУ и ПГУ–ВЦГ связан с дополнительными затратами энергии в ПГУ–ВЦГ на газификацию угля и подготовку синтез-газа к сжиганию в ГТУ. На металлургических ПГУ топливо является побочным продуктом основного цикла предприятия и затраты на его подготовку невелики.

Топливный разрыв в эффективности между металлургическими ПГУ и ПГУ на природном газе связан с большими затратами на сжатие топливного газа и меньшей работой расширения газовой турбины металлургических ПГУ. Меньшее значение работы расширения обусловлено более высоким содержанием CO₂ и низким содержанием H₂O в рабочем теле газовой турбины металлургической ПГУ по сравнению с рабочим телом газовой турбины на природном газе.

В работе [3] проведена оценка срока окупаемости перехода с утилизационных ТЭЦ на ПГУ на доменном газе для объемов выработки доменного газа крупнейших металлургических предприятий России – НМЛК, ММК, Северсталь. В результате срок окупаемости ПГУ составил 3,6 года. Выполненная оценка показала, что использование ПГУ на доменном газе позволяет снизить расходы предприятия на покупку электрической энергии на 6,8 млрд. руб/год и сократить потребление коксового газа на 0,3 млрд.м³/год. Полученный срок окупаемости – 3,6 года – в 1,5–2 раза ниже, чем для ТЭС, где нормальным является срок окупаемости 5–7 лет.

Таким образом, применение комбинированного цикла открывает значительные возможности для техперевооружения энергетической базы основных металлургических предприятий стран с развивающейся экономикой. В Уральском энергетическом институте с участием авторов разрабатываются технологические решения, направленные на уменьшение топливного разрыва в эффективности между металлургическими ПГУ и ПГУ на природном газе [9].

Список использованных источников

1. Курунов И.Ф. Доменное производство Китая, Японии, Северной Америки, Западной Европы и России / И.Ф. Курунов // *Металлург.* – 2010. – № 2. – С. 69–77.
2. World Steel Association, 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive.html> (дата обращения: 28.06.2017).
3. Рыжков А.Ф. Повышение эффективности использования доменного газа на металлургических предприятиях России / А.Ф. Рыжков, Е.И. Левин, П.С. Филиппов, Н.А. Абаимов, С.И. Гордеев // *Металлург.* – 2016. – № 1. – С. 26–34.
4. Ziębik A. Determination of the optimal structure of repowering a metallurgical CHP plant fired with technological fuel gases / A. Ziębik, M. Warzyc, P. Gładysz // *Archives of metallurgy and materials.* – 2014. – Vol. 59. – № 1. – P. 42–48.
5. Статистический Ежегодник мировой энергетики 2014 (название с экрана) [Электронный ресурс]. URL: <http://yearbook.enerdata.ru/natural-gas-consumption-in-the-world.html> (дата обращения: 28.06.2017).
6. Лисиенко В.Г. Энергетические возможности бескоксовых технологий производства черных металлов / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, А.В. Лаптева // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2008. – № 9. – С. 56–61.
7. Best Available Techniques (BAT). Reference Document for Iron and Steel Production [Электронный ресурс]. URL: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu> (дата обращения: 28.06.2017).
8. Салманов А.А. Утилизационная ТЭЦ на НовOLIпецком металлургическом комбинате / А.А. Салманов // *Турбины и дизели.* – 2012. – Т. 44. – № 5 – С. 32–39.
9. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией / Абаимов Н.А., Амарская И.Б., Белоусов В.С. [и др.]; под ред. Рыжкова А.Ф. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 564 с.
10. Hunan Waste Gas Based Power Project in Liangang Group. Clean development mechanism project design document form (CDM–PDD) Version 03 – in effect as of: 28 July 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://cdm.unfccc.int/filestorage/1/T/S/1TSHRMD0AN5B3CWG7ZI2LK4JPU6VYX/PDD.pdf?t=ZXN8bnBtbDdvfDDKWaZVaVlbLiWkMYiXcbhm> (дата обращения: 28.06.2017).
11. Takano H. Design for the 145–MW Blast Furnace Gas Firing Gas Turbine Combined Cycle Plant / H. Takano, Y. Kitauchi, H. Hiura // *Transactions of the ASME.* – 1989. – № 111. – P. 42–48.
12. Mulder J. Blast-Furnace Gas Cuts Costs at Ijmond1 / J. Mulder, P. Havennar, D. Santen // *Modern Power Systems*, September 1996.
13. Thoraval G. Blast-Furnace Gas: an Incentive for Italy / G. Thoraval, S. Simonetti, E. Malusardi // *Power Engineering.* – 1998. – № 5. – P. 10–18.
14. Строительство парогазовой электростанции мощностью 454,5 МВт на металлургических газах на Алчевском металлургическом комбинате [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ipee.org.ua/ru/energozberezhenie/proekty-v-sfere-metallurgii/62-budivnytvo-parogazovoji-elektrostantsiji.html>.
15. Otsuka H. Anshan Iron & Steel Group Corporation, China, Construction and Operation Experience of 300 MW Blast Furnace Gas Firing Combined Cycle Power Plant / H. Otsuka, H. Tanabe, S. Harada, S. Tanaka, J. Obata, C. Xuewen // *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review.* – 2007. – Vol. 44. – №. 4. – P. 1–6.
16. Matsuda H. Large-Capacity, High-Efficiency BFG-Firing Combined Cycle Plant with F Series Gas Turbine / H. Matsuda, T. Komori, Y. Oka, N. Yamagami // *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review.* – 2004. – Vol. 41. – № 5. – P. 1–3.
17. Kennedy H. Update on U.S. DOE/OCDO Advanced Ultrasupercritical (A–USC) Steam Boiler and Turbine Consortium [Электронный ресурс]. URL: https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Events/2015/crosscutting/Crosscutting_20150429_0830_A_EIO.pdf.

18. T. Ai, J. Masada, E. Ito. Development of the High Efficiency and Flexible Gas Turbine M701F5 by Applying “J” Class Gas Turbine Technologies// Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2014. – Vol. 51. – № 1. – P. 1–9.

19. Powering a new record at EDF. 9HA.01 sets efficiency world record [Электронный ресурс]. URL: https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/product/gas%20turbines/White%20Paper/gea32885-bouchain-whitepaper-final-aug-2016.pdf.

УДК 66.971

А. П. Скуратов, А. С. Потапенко, Н. П. Попиякова

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ПРЕССОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

Аннотация

Рассмотрены особенности технологического процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов. Изложена разработанная на базе программного продукта Ansys CFX трехмерная математическая модель установки, позволяющая оценить динамику изменения теплового состояния элементов ее конструкции. Представлены результаты расчета теплообмена при реализации процесса литья и прессования алюминиевого сплава на опытной лабораторной установке.

Ключевые слова: установка, непрерывное литье и прессование, компьютерная модель, теплообмен.

Abstract

There have being observed the parameters of technological process of non-ferrous metals continual casting & extrusion. The three-dimensional mathematical model of the continuous casting and extrusion installation has been designed with Ansys CFX software. The model helps to estimate dynamics of thermal state changes of the installation elements. There are the results of calculations of heat exchange while aluminum alloy casting and extrusion with the experimental laboratory installation.

Key words: installation, continuous casting and extrusion, computer model, heat exchange.

Введение

Процессы обработки цветных металлов и сплавов включают в себя такие основные металлургические переделы, как литье заготовки, пластическую деформацию и термообработку. Тенденцией развития металлургической отрасли является совмещение этих переделов в одну непрерывную технологическую линию.

Установки, реализующие энерго- и ресурсосберегающую технологию совмещения операций литья и обработки давлением, имеют разнообразные конструкции. Одной из таких машин является установка непрерывного литья и прессования (НЛиП) с горизонтальным карусельным кристаллизатором, разработанная сотрудниками кафедры обработки металлов давлением Сибирского федерального университета. Однако на сегодняшний день не создано промышленных образцов установок данной конструкции, которые бы надежно эксплуатировались на рынке производства прессовой продукции. Связано это с тем, что начальный период работы, после пуска установки (переходный тепловой режим), характеризуется нестационарным тепловым состоянием ее элементов. При выходе же на стационарный тепловой режим существенное влияние на температурно-временные условия